БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621. 331 : 621.311 + 06 10.23947/1992-5980-2018-18-1-132-137

Обеспечение безопасных условий эксплуатации силовых трансформаторов при тепловых воздействиях токов коротких замыканий *

А. В. Костюков[1], В. А. Соломин[2], А. А. Костюков[3]**
[1,2,3] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Ensuring safe operating conditions for power transformers under thermal effects of short-circuit currents ***

A. V. Kostyukov[1], V. A. Solomin[2], A. A. Kostyukov[3]**
[1,2,3] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Силовые трансформаторы относятся к основному оборудованию систем электроснабжения промышленных предприятий. Одними из основных показателей, определяющими срок службы трансформатора, в том числе его эксплуатационные характеристики, являются состояние и остаточный ресурс его изоляции. Старение и износ изоляции напрямую связаны с температурными режимами работы трансформатора в процессе эксплуатации, а также надёжной работой системы охлаждения. Данное направление научных исследований является актуальным, особенно если речь идёт о силовых трансформаторах, работающих при номинальных нагрузках.
Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассматриваются силовые трансформаторы районных подстанций, питающие промышленные и транспортные предприятия. В статье рассмотрены режимы работы силовых трансформаторов, которые обусловлены неравномерной загруженностью фаз и короткими замыканиями. Все эти факторы приводят к температурным деформациям изоляции силовых трансформаторов и, как правило, к выходу из строя силовых трансформаторов.
Результаты исследования. В работе рассматривается разработанная авторами принудительная система охлаждения силовых трансформаторов, которая позволяет увеличить поверхность охлаждения силового трансформатора и объем охлаждающей жидкости. Были выполнены тепловые расчёты нагрева элементов конструкции силового трансформатора при традиционной и предложенной авторами системах охлаждения. Сравнительный анализ и расчёты показали целесообразность использования разработанной системы охлаждения силовых трансформаторов, которая позволяет продлить срок службы изоляции. Разработанная система охлаждения является принудительной. В качестве дополнительного расширителя авторами был использован бак резервного силового трансформатора. Данное конструктивное решение может быть реализовано для трансформаторов, работающих при низких температурах, а также при продолжительных предельных нагрузках.
Выводы. Разработанная система охлаждения не требует боль-

Introduction. Power transformers are the basic equipment of the industrial power systems. One of the key indicators of determining the service lifetime of the transformer including its performance characteristics is the condition and residual life of its isolation. Aging and f insulation deprecation are directly related to the operating temperature of the transformer in use, as well as to the reliable operation of the cooling system. This research direction is up-to-date, especially when it comes to fully rated power transformers.
Materials and Methods. Power transformers of the district substations that feed the industrial and transport enterprises are considered. Modes of power transformers, which are caused by the uneven workload of the phases and short-circuiting, are studied. All these factors lead to the thermal deformation of the power transformer insulation and, as a rule, to the outage of power transformers.
Research Results. The forced cooling system of power transformers, which allows increasing their cooling capacity and the cooling fluid volume, is developed by the authors and described in the paper. Thermal calculations of heating design elements of the power transformers are carried out both in the conventional cooling system and the new one. The comparative analysis and calculations have shown the feasibility of the developed cooling system of power transformers, which allows extending the insulation lifetime. The developed cooling system is forced. The authors used a reserve power transformer tank as an additional expander. This design solution can be implemented for transformers operating at low temperatures, as well as under long-term limit loads.
Discussion and Conclusions. The developed cooling system

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: kav@rgups.ru, oda@rgups.ru, pel_oda@rgups.ru, ema@rgups.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ших затрат на приобретение дополнительного оборудования и техническое обслуживание, может быть использована в энергетических хозяйствах промышленных предприятий и на предприятиях железнодорожного транспорта.

eliminates the requirement for purchase costs on extra equipment and maintenance support. It can be used at the enterprise power facilities and in the rail transportation.

Ключевые слова: силовой трансформатор, подстанции, короткие замыкания, обмотка трансформатора, изоляция, нагрев обмоток, температурные режимы, система охлаждения.

Keywords: power transformer, substations, short-circuit, transformer winding, insulation, winding heating, temperature conditions, cooling system.

Образец для цитирования. Костюков, А. В. Обеспечение безопасных условий эксплуатации силовых трансформаторов при тепловых воздействиях токов коротких замыканий / А. В. Костюков, В. А. Соломин, А. А. Костюков // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18. — С. 132−137.

For citation: A.V. Kostyukov, V.A. Solomin, A.A. Kostyukov. Ensuring safe operating conditions for power transformers under thermal effects of short-circuit currents. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 132−137.

Введение. Продолжительность срока работы трансформаторов во многом зависит от срока службы изоляционных материалов, которые используются в конструкции трансформатора. Продолжительные температурные, химические и динамические воздействия вызывают старение изоляционных материалов, что приводит к снижению электрической прочности и изменению механических характеристик. В конечном итоге силовой трансформатор выходит из строя. При этом возможен взрыв трансформаторного масла и пожар. Поэтому уделяется особое внимание созданию новых, устойчивых к температурным, химическим и динамическим воздействиям изоляционных материалов, а также системе охлаждения силовых трансформаторов.

Основная часть. Рассмотрим наиболее неблагоприятные режимы работы силовых трансформаторов.

1. Нагрев обмоток трансформатора при коротких замыканиях (КЗ) происходит под действием изменяющегося значения тока КЗ. При этом обмотка нагревается от действия как периодической, так и апериодической составляющей тока КЗ. Короткое замыкание трансформатора длится около (0,1÷0,5) с и определяется временем отключения повреждения $t_{\text{отк}}$ [1].

$$t_{\text{отк}} = t_{\text{з}} + t_{\text{в}}\,, \qquad (1)$$

где $t_{\text{з}}$ — время работы релейной защиты, с; $t_{\text{в}}$ — время срабатывания выключателя, с.

Время нагрева обычно не превышает 0,1 постоянной времени нагрева. Это позволяет при тепловых расчетах режима КЗ не учитывать количество тепла, выделяемого обмотками трансформатора в окружающую среду, и тепловой процесс считать адиабатическим. Тем не менее, температура его обмоток может достигнуть больших величин, которые являются недопустимыми для твердой изоляции обмоток масляных трансформаторов. ГОСТ Р 51 559–2 000 устанавливает, что температура обмоток при установившихся токах и заданной длительности не должна превышать [2, 3]:

а) для масляных трансформаторов с обмотками из меди и изоляцией класса нагревостойкости А — 250 ºС;

б) то же с обмотками из алюминия — 200 ºС.

Длительность КЗ на зажимах трансформатора не должна превышать:

$$t_{\text{к}} = \tau \frac{\tau_k - \tau_{\text{н}}}{\alpha \cdot \delta_k^2} \cdot 10^3, \text{с} \qquad (2)$$

где τ_k — допустимая температура обмотки при КЗ;

$\tau_{\text{н}}$ — начальная температура обмотки, принимаемая равной допустимому превышению температуры по норме плюс наибольшая температура окружающей среды;

δ_k — плотность установившегося тока КЗ, А / мм ^{2} ;

α — коэффициент, выбираемый по табл. 11.1 из [4].

Время нагревания обмотки до предельной температуры обычно не превышает 5 ÷ 15 секунд.

Релейная защита предотвращает нагревание обмоток до предельной температуры, а при близких КЗ обмотка нагревается приблизительно до (60 ÷ 80) ºС.

2. На тепловой пробой и старение изоляции влияет еще и специфика работы силовых трансформаторов. Нагрузка силовых трансформаторов носит резко неравномерный характер, что усугубляется короткими замыканиями и внешними температурными воздействиями.

На каждой подстанции используется два силовых трансформатора, рассчитанных на полную нагрузку потребителя, один из которых находится в резерве.

В зимнее время года при низких температурах в резервном трансформаторе происходит застывание масла до вазелинообразного состояния. Для равномерного износа оборудования трансформаторы подключаются к нагрузке попеременно.

После подключения резервного трансформатора, в первый период времени охлаждение обмоток трансформатора практически отсутствует, так как в жидком состоянии находится лишь небольшое количество масла в зоне, непосредственно прилегающей к обмотке. Затем в течение $12 \div 15$ часов происходит постепенный прогрев всей массы масла в трансформаторе, после чего циркуляция масла восстанавливается.

Таким образом, в зимнее время имеют место циклические перепады температуры обмоток и всех крепящих обмотку конструкций — от низких отрицательных значений температуры окружающей среды до высоких положительных значений, величины которых не контролируются.

Неравномерность нагрева может достигать $120 \div 150$ ºС и выше. Ситуация усугубляется тем обстоятельством, что отдельные фазы трансформатора нагружены резко неравномерно. Нагрузка наиболее загруженной фазы может отличаться в три раза.

Соответственно, количество выделяющегося тепла в этих фазах будет отличаться в $9 \div 10$ раз. Поэтому в конструкциях появляются температурные деформации и температурные напряжения, которые способствуют ослаблению крепления отдельных элементов, а также появлению микротрещин.

Эти факторы в дальнейшем неизбежно проявляются при КЗ и сопутствующих ему динамических усилиях.

Можно снизить вероятность местных перегревов конструкций силовых трансформаторов, если в зимний период, перед вводом в эксплуатацию, резервный трансформатор подключить к сети и прогреть трансформаторное масло на холостом ходу. Это подготовит трансформатор к «нормальной» работе, но приведёт к дополнительным потерям электроэнергии.

Сезонный и нагрузочный перегрев обмоток силовых трансформаторов можно снизить с минимальными затратами, используя в качестве расширителя бак резервного трансформатора. Общий вид устройства для охлаждения силовых трансформаторов представлен на рис. 1.

Рассмотрим принцип действия устройства охлаждения силовых трансформаторов. Перед подключением резервного трансформатора открывают вентили 7, 8, 9, 10 и включают компрессоры 5, 6. При подключении компрессоров происходит принудительная циркуляция нагретого масла из бака трансформатора 1, работающего под нагрузкой, в бак резервного трансформатора 2 и наоборот. Происходит прогрев масла в резервном трансформаторе. При низких температурах нормальная консистенция масла в резервном трансформаторе восстанавливается за 3–5 часов. После прогрева и восстановления циркуляции масла резервный трансформатор подключают под нагрузкой.

Вентили 7, 8, 9, 10 в устройстве охлаждения силовых трансформаторов предназначены для подачи масла в трубопроводы, а также для технического обслуживания компрессоров 5, 6 и трансформаторов 1, 2.

В летний период времени система охлаждения работает постоянно, особенно при увеличении нагрузки. При этом устройство охлаждения силовых трансформаторов охлаждает обмотки работающего трансформатора и равномерно распределяет нагретое масло между двумя баками, охлаждая его за счёт увеличения объёма масла и площади охлаждения поверхности баков трансформаторов 1 и 2.

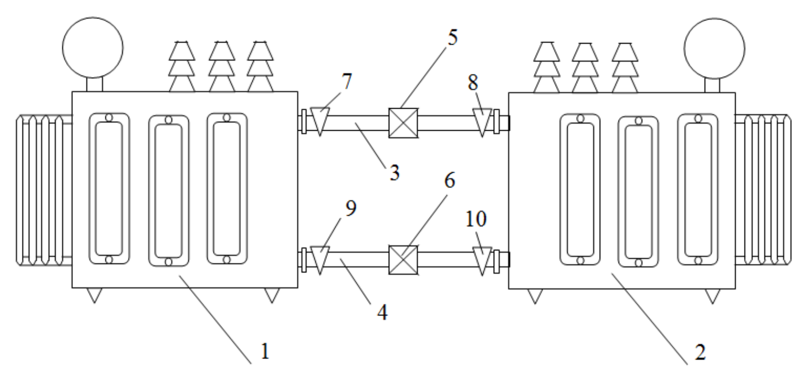


Рис. 1. Устройство для охлаждения силового трансформатора

Fig. 1. Device for cooling the power transformer

Рассмотрим целесообразность использования устройства охлаждения силовых трансформаторов. В качестве примера рассчитаем нагрев элементов конструкции трехфазного трехобмоточного трансформатора

ТДТНЭ–40000/110 и устройства охлаждения силового трансформатора при различных нагрузках. За основу возьмём режимный день силового трансформатора тяговой подстанции электрических железных дорог и воспользуемся методикой расчёта, изложенную Л. Киш.

Далее рассчитаем нагрев активных и неактивных частей трансформатора при переменной нагрузке во времени. Введем следующие обозначения: $K = S/S_n$ — отношение фактической нагрузки к номинальной; $\gamma = P_К/P_х$ — отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода. Для обозначения температур, относящихся к номинальной нагрузке, введем дополнительный индекс n.

Возьмем для расчета трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТНЭ–40000/110; напряжение обмоток $U_{ВН}$=115 кВ, $U_{СН}$=27,5 кВ, $U_{НН}$= 6,6 кВ; напряжение короткого замыкания $U_{ВН—СН}$=6,0 %, $U_{ВН\text{-}НН}$=17,0 %, $U_{СН\text{-}НН}$=10,5 %; потери холостого хода $P_х$=63 кВт; потери короткого замыкания $P_к$=240 кВт; ток холостого хода $I_{хх}$ =0,9 %.

Наибольшее превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды (воздуха):

$$\Delta\vartheta_{max} = \Delta\vartheta_{отп}(\frac{1+\gamma K^2}{1+\gamma})^m. \quad (3)$$

Согласно рекомендациям МЭК примем для принудительной циркуляции масла $\Delta\vartheta_{отп}$ = 40°С , $m = 1{,}0.$

Рассчитаем превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой охлаждающей среды (воздуха):

$$\Delta\vartheta_{с} = \Delta\vartheta_{отп}(\frac{1+\gamma K^2}{1+\gamma})^m + 1{,}1\Delta\vartheta_{(t-0)n}K^{2n}. \quad (4)$$

При принудительной циркуляции масла n = 0,9.

Превышение средней температуры масла в обмотке над температурой охлаждающей среды (воздуха):

$$\Delta\vartheta_{стм} = \Delta\vartheta_{стмn}(\frac{1+\gamma K^2}{1+\gamma})^m. \quad (5)$$

Превышение средней температуры обмотки над температурой охлаждающей среды (воздуха):

$$\Delta\vartheta_{сто} = \Delta\vartheta_{стм} + \Delta\vartheta_{(t-0)^n}K^{2n}. \quad (6)$$

Магнитопровод трансформатора нагревается под действием электромагнитного поля обмоток силового трансформатора. Для упрощения расчётов можно принять температуру магнитопровода равную 80% от температуры обмотки. Общее количество передаваемого тепла осталось прежним, но изменились разница температур, площадь охлаждаемой поверхности бака и масса.

Графики зависимости температур магнитопровода, обмотки и масла представлены на рис. 2.

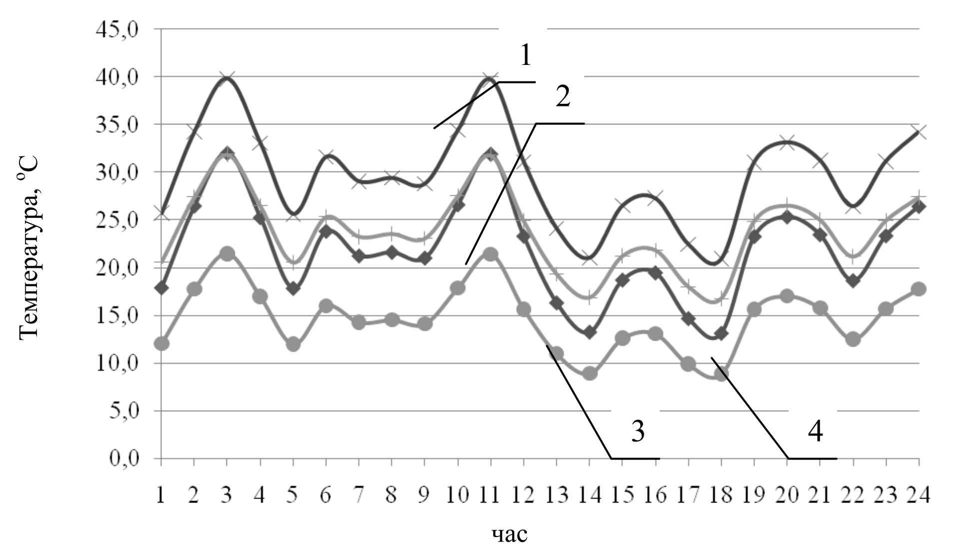


Рис. 2. Результаты тепловых расчетов трансформатора ТДТНЭ–40000/110
с новой системой охлаждения и без нее: 1 — зависимость изменения температуры обмотки от нагрузки; 2 — зависимость изменения температуры магнитопровода от нагрузки; 3 — зависимость изменения температуры масла от нагрузки; 4 — звисимость изменения температуры масла от нагрузки с новой системой охлаждения

*Fig. 2. Results of thermal calculations of transformer TDTNE-40000/110
with a new cooling system and without it: 1 - dependence of winding temperature change on the load; 2 - dependence of temperature variation of magnetic circuit on the load; 3 - dependence of change in oil temperature on the load; 4 - temperature dependence of oil temperature on load with a new cooling system*

Из полученных результатов видно, что предложенный вариант устройства охлаждения силового трансформатора понижает температуру трансформаторного масла в полтора раза.

Выводы. По сравнению с традиционными системами охлаждения силовых трансформаторов, рассмотренное устройство исключает возможность возникновения местных перегревов обмоток силовых трансформаторов, как в зимний, так и в летний период эксплуатации при различных режимах работы силовых трансформаторов, требует минимальных затрат на обслуживание и установку. При этом срок службы изоляции обмоток возрастает более чем в два раза, следовательно, увеличивается срок службы самого трансформатора.

Библиографический список

1. Фигурнов, Е. П. Релейная защита сетей тягового электроснабжения переменного тока / Е.П. Фигурнов. — Москва : Маршрут, 2006. — 272с.
2. ГОСТ Р 51559–2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Трансформаторы силовые масляные классов напряжения 110 и 220 кВ и автотрансформаторы напряжением 27,5 кВ для электрических железных дорог переменного тока / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Стандартинформ, 2000. — 13 с.
3. ГОСТ Р 52719–2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Трансформаторы силовые. Общие технические условия / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Стандартинформ, 2007. — 40 с.
4. Испытание трансформаторов малой и средней мощности на напряжение до 35 кВ включительно / под ред. Г. П. Терезы. — Москва : Энергия, 1969. — 296 с.
5. Киш, Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / пер. с венг. М.А. Бики ; ред. пер. с венг. Г. Е. Тарле. — Москва : Энергия, 1980. — 208 с.
6. Liu, J. Transformer Simulation and Evaluation of Power Winding Short-circuit Dynamic Stability / J. Liu, A. H. Zhang // Transformer. — 2012. — Vol. 49, No. 6. — P. 14–25.
7. Analysis of thermal state of power transformer of captive power plant / Y.N. Kondrashova, R.R. Khramshin, A.A. Nikolaev, G.V. Shurygina // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 129. — P. 832–838.
8. German, L.A. Calculation of short-circuit currents in ac traction railroad networks / L.A. German, A.V. Sharov // Электричество. — 2003. — № 3. — С. 27–34.
9. Guy, A. Automated calculation of short-circuit currents using software «elplek» / A. Guy, S. Didenko // Науковий вісник нубіп України. Серія: Техніка та енергетика АПК. — 2014. — № 194-2. — С. 82-90.
10. Tian, M. Short-circuit reactances of a controllable reactor of multi-parallel branch type's influence on its branch reactances and currents / M. Tian, D. Yang // Diangong jishu xuebau. — 2014. — Vol. 29, No. 7. — P. 237–243.

References

1. Figurnov, E.P. Releynaya zashchita setey tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka. [Relay protection of AC traction energy networks.] Moscow: Marshrut, 2006, 272 p. (in Russian).
2. GOST R 51559–2000. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Transformatory silovye maslyanye klassov napryazheniya 110 i 220 kV i avtotransformatory napryazheniem 27,5 kV dlya elektricheskikh zheleznykh dorog peremennogo toka. [GOST 51559–2000. General-purpose oil-immersed power transformers of 110 and 220 kV and autotransformers of 27.5 kV for electric a.c. railways.] Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC). Moscow: Standartinform, 2000, 13 p. (in Russian).
3. GOST R 52719–2007. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Transformatory silovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [GOST R 52719–2007. Power transformers. General specifications.] Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC). Moscow: Standartinform, 2007, 40 p. (in Russian).
4. Tereza, G.P., ed. Ispytanie transformatorov maloy i sredney moshchnosti na napryazhenie do 35 kV vklyuchitel'no. [Voltage testing of small- and medium-power transformers up to including 35 kV.] Moscow: Energiya, 1969, 296 p. (in Russian).
5. Kish, L. Nagrev i okhlazhdenie transformatorov. [Heating and cooling of transformers.] Biki, M.A., transl. from Hungarian; Tarle, G.E., ed. Moscow: Energiya, 1980, 208 p. (in Russian).
6. Liu, J., Zhang, A.H. Transformer Simulation and Evaluation of Power Winding Short-circuit Dynamic Stability. Transformer, 2012, vol. 49, no. 6, pp. 14–25.
7. Kondrashova, Y.N., Khramshin, R.R., Nikolaev, A.A. , Shurygina, G.V. Analysis of thermal state of power transformer of captive power plant. Procedia Engineering, 2015, vol. 129, pp. 832–838.
8. German, L.A., Sharov, A.V. Calculation of short-circuit currents in ac traction railroad networks. Electrical Technology Russia, 2003, no. 3, pp. 27–34.

9. Guy, A., Didenko, S. Automated calculation of short-circuit currents using software «elplek». Науковий вісник нубіп України. Серія: Техніка та енергетика АПК, 2014, no. 194-2, pp. 82-90.

10. Tian, M., Yang, D. Short-circuit reactances of a controllable reactor of multi-parallel branch type's influence on its branch reactances and currents. Diangong jishu xuebau, 2014, vol. 29, no. 7, pp. 237–243.

Поступила в редакцию 06.10.2017
Сдана в редакцию 10.10.2017
Запланирована в номер 20.01.2018

Received 06.10.2017
Submitted 10.10.2017
Scheduled in the issue 20.01.2018

Об авторах:

Костюков Александр Владимирович,
доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0902-0492
oda@rgups.ru

Соломин Владимир Александрович,
профессор кафедры «Электрические машины и аппараты» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org /0000-0002-5749-3489
ema@rgups.ru

Костюков Александр Александрович,
аспирант кафедры «Электрические машины и аппараты» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID: http://orcid.org /0000-0003-1344-4439
pel_oda@rgups.ru

Authors:

Kostyukov, Alexander V.,
associate professor of the Theoretical Basics of Electrical Engineering Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0902-0492
oda@rgups.ru

Solomin, Vladimir A.,
professor of the Electrical Machines and Devices Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org /0000-0002-5749-3489
ema@rgups.ru

Kostyukov, Alexander A.,
postgraduate student of the Electrical Machines and Devices Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2).,
ORCID: http://orcid.org /0000-0003-1344-4439
pel_oda@rgups.ru